

CERCETĂRI ASUPRA CONCENTRATORILOR DE TENSIUNE LA RECIPIENTELE SUB PRESIUNE

~ REZUMAT ~

Un recipient sub presiune este un recipient închis, proiectat pentru a deține gaze sau lichide la o presiune diferită substanțial față de presiune mediului ambiant.

Forma recipientelor sub presiune este de regulă axial-simetrică (cilindrică, sferică, conică, etc.), deoarece reprezintă o soluție optimă în vederea dezvoltării unui recipient cu rezistență cât mai mare și un consum de material cât mai mic.

Exploatarea la temperaturi și presiuni ridicate a recipientelor sub presiune duc la afectarea stării de tensiune și deformație, a acestora, ca urmare a mai multor factori, dar cel mai important este efectul de concentrare al tensiunilor. Pentru acesta este necesar un studiu al concentrării tensiunilor. Acesta se poate realiza prin metode experimentale folosind mașini de încercat atât statice cât și dinamice precum și metode de modelare cu elemente finite, programul ABAQUS fiind unul dintre cele mai folosite la modelarea recipientelor sub presiune.

Studiul efectului de concentrare al tensiunilor pentru recipiente sub presiune este un domeniu foarte important, actual și de interes crescut în cercetarea științifică, datorită importanței sale sub aspectul siguranței în exploatare și implicațiilor ce le pot avea în urma accidentelor produse în caz de avarie.

Aproape inevitabil, în oricare componentă din structurile ingineresti, tensiunile variază de la un punct la altul, cedările producându-se în zonele unde tensiunile sunt relativ mari. Condițiile care pot determina o creștere a nivelului tensiunii într-un punct sunt foarte variate [Negru, (2009); Boresi, (1993)]:

- modificările bruște de secțiune, de exemplu cele produse în secțiunea unei bare de prezența unei găuri sau în secțiunea unui arbore de prezența unui canal de pană;
- tensiunile de contact în punctele de aplicare a forțelor exterioare, de exemplu la contactul dintre dinții a două roți aflate în angrenare, la contactul roată-șină sau la contactul dintre bilele de rulment și căile de rulare;
- defecte de material, de exemplu incluziunile nemetalice dintr-un oțel, sau variațiile de rezistență și rigiditate ale constituenților structurali;
- tensiunile reziduale dintr-o piesă, rezultatul unor prelucrări mecanice (extrudare, laminare, forjare, turnare), al tratamentelor termice aplicate piesei sau al operațiilor tehnologice de sudare;
- fisurile existente într-o structură, din diverse cauze (oboseală, sudare, prelucrare prin așchiere);
- interfața dintre două materiale, de exemplu în cazul îmbinărilor lipite caracteristicile mecanice diferite ale adezivului și aderenților conduc la o concentrare locală a tensiunilor.

Toate aceste condiții, care produc valori și distribuții ale tensiunilor și deformațiilor specifice diferite în mod esențial de cele calculate cu formulele simple

2 Rezumat

ale rezistenței materialelor, sunt denumite concentratori de tensiune sau discontinuități.

Dintre acestea un loc tot mai important îl ocupă îmbinările sudate. Îmbinările sudate reprezintă factori importanți de concentrare a tensiunilor atât din punct de vedere constructiv precum și din punct de vedere al proprietăților materialului de bază și a materialului de adaos, care datorită temperaturilor înalte și a zonelor de tranziție pot reprezenta modificări importante cum ar fi apariția zonelor cu fragilitate ridicată, defecte de structură, micro-fisuri, etc.

Se constată pe plan mondial că noile tehnologii de fabricație utilizează tot mai mult îmbinările sudate în realizarea recipientelor sub presiune. Acest lucru a devenit posibil datorită tehnologiilor de control nedistructiv integrat în procesul tehnologic de fabricație. Cu toate acestea îmbinările sudate reprezintă un factor important de concentrare al tensiunilor atât prin forma constructivă cât și prin modificările ce apar la nivelul proprietăților de material datorită zonei influențate termic.

Datorită acestor considerente există în momentul de față un interes crescut din partea proiectanților și producătorilor din industrie privind eliminarea riscurilor în exploatare pentru zonele îmbinate prin sudură.

Teza de doctorat este concepută pe patru capitole de bază la care se adaugă un ultim capitol în care autorul prezintă detalierea contribuțiilor personale la rezolvarea temei propuse și bibliografia.

După prezentarea importanței și a actualității temei de cercetare, autorul prezintă în **Capitolul 2** stadiul actual al cercetărilor privind studiul concentratorilor de tensiune la recipientele sub presiune. Într-o primă etapă sunt prezentate aspectele generale privind problematica recipientelor sub presiune. Accentul a fost pus pe prezentarea elementelor constructive ale recipientelor sub presiune și pe materialele folosite în vederea realizării recipientelor sub presiune. S-a constatat că tabele din oțel laminat sudabil cu granulație fină sunt cele mai utilizate în construcția recipientelor sub presiune.

În continuare sunt prezentate relațiile fundamentale care sunt utilizate în exprimarea coeficientului de concentrare al tensiunilor. Se prezintă modul de calcul al coeficientului global de concentrare a tensiunilor și coeficientul net de concentrare al tensiunilor. Totodată este prezentat conceptul fundamental în mecanica ruperii liniar-elastice care descrie distribuția tensiunilor din vecinătatea vârfului fisurii, și anume factorul de intensitate al tensiunii K .

Subcapitolul 2.3. intitulat "Concentratori de tensiune pentru recipientele sub presiune", prezintă o analiză a lucrărilor din domeniul concentratorilor sub presiune. S-a observat că tendințele în studiul tensiunilor de la orificiile recipientelor sub presiune (atât cu pereți groși cât și subțiri) a fost de a se utiliza metoda elementelor finite. În continuare este prezentat soluția lui Lamé pentru un cilindru cu presiune interioară precum, cazul unui cilindru presurizat cu un concentrator de tensiune de tip gaură circulară și cazul unui recipient sub presiune cu pereți în trepte și cu guler de racordare $R/H \approx 10$.

În încheierea subcapitolului sunt prezentate aspecte generale despre îmbinările sudate. Un aspect foarte important în studiul îmbinărilor sudate fiind viteza de încălzire respectiv viteza de răcire. S-a arătat că viteza de încălzire, dar mai ales viteza de răcire influențează puternic asupra transformărilor structurale. În cazul oțelurilor sensibile la călire, în funcție de viteza de răcire, poate să apară sorbita, troostita bainita, martensita care creează tendința de rupere fragilă a

îmbinării. În astfel de cazuri pot apărea fisuri în zona influențată termic chiar numai sub acțiunea tensiunilor proprii create la sudare [Aldea, (1972)].

După cum s-a putut observa în urma realizării studiului bibliografic concentratorii de tensiune sunt unul dintre factorii importanți care trebuie studiați la orificiile recipientelor sub presiune. Totodată s-a putut observa că pentru orificiile multiple cu diverse moduri de dispunere pentru recipiente sub presiune nu există informații suficiente. Cele mai multe cazuri din literatură de specialitate abordând prezența unui singur orificiu.

De asemenea se evidențiază faptul ca îmbinările sudate reprezintă factori importanți de concentrare a tensiunilor atât din punct de vedere constructiv precum și din punct de vedere al proprietăților materialului de bază și materialului de adaos care datorită temperaturilor înalte și zonelor de tranziție pot reprezenta modificări importante cum ar fi apariția zonelor cu fragilitate ridicată, defecte de structură, microfisuri, etc.

Schimbarea bruscă a secțiunii pereților elementelor de rezistență creează o distribuție neuniformă a tensiunilor în secțiune și o concentrare locală a tensiunilor [Nikolaev, (1955); Nădășan, (1962)]. Cei mai frecvenți concentratori de tensiuni sunt: variațiile brusce de secțiune la îmbinări, racorduri, găuri, adâncituri locale, defecte de compactitate în material și în îmbinări, interstii, etc.

În porțiunea de concentrare a tensiunilor se pot produce fisuri în material și ruperea pereților pe linia de slabă rezistență, la solicitări inferioare rezistenței admisibile. Sensibilitatea la creșterea a materialului este condiționată de calitatea materialului, natura, mărimea și poziția creșterii, natura și mărimea solicitării, etc. efectele creșterii se măresc în cazul creșterilor ascuțite și a metalelor cu plasticitate redusă [Aldea, (1972)].

În cadrul acestui capitol sunt prezentate cercetările experimentale efectuate asupra oțelului marca P355NH, folosit în construcția vaselor sub presiune

Capitolul 3 intitulat "Cercetări experimentale asupra proprietăților elastice și mecanice care influențează fenomenul de concentrare al tensiunilor la recipientele sub presiune" prezintă cercetările experimentale efectuate asupra oțelului marca P355NH, folosit în construcția vaselor sub presiune.

Capitolul are în componența sa 12 subcapitole după cum urmează:

3.1. Programul experimental pentru testarea îmbinărilor sudate la tabelele din oțel marca P355NH

3.2. Determinarea direcției de laminare

3.3. Determinarea compoziției chimice

3.4. Realizarea îmbinării sudate

3.5. Debitarea plăcii în vederea realizării epruvetelor

3.6. Metoda simulatoarelor de cicluri termice

3.7. Examinarea micro/macrosopică a îmbinărilor sudate

3.8. Determinarea de durității HV10 pentru îmbinările sudate

3.9. Determinarea caracteristicilor de tracțiune

3.10. Determinarea energiei de rupere la încercarea de încovoiere prin șoc / determinarea tenacității la rupere

3.11. Evaluarea ductilității și imperfecțiunilor în zonele îmbinări sudate prin îndoiri laterale

3.12. Determinarea modulului de elasticitate longitudinal utilizând metoda excitării prin impuls.

Într-o primă etapă s-a realizat determinarea direcției de laminare a plăcii din oțel marca P355NH utilizând metoda replicilor metalografice.

4 Rezumat

Metoda replicilor metalografice se bazează pe reproducerea microtopografiei unei zone pregătite anterior pentru analiza metalografică, prin aplicarea unor folii de acetat de celuloză acoperite ulterior cu un strat reflectorizant de aluminiu [Turcu (1995)].

În continuare s-a determinat compoziția chimică a plăcii și validarea rezultatelor cu standardul SR EN 10028.

Următorul pas a fost de a realiza îmbinarea sudată cap la cap, iar pentru aceasta, placa a fost debitată cu jet de apă.

Pentru a se asigura o pătrundere a sudurii pe toată grosimea metalului de bază s-a utilizat rostul de sudare în X. Rosturile în X sunt cele mai utilizate la sudarea pe cele două părți a tablelor groase cu grosimea $s=16-60$ mm din oțel carbon, slab aliate, aliate, sau înalt aliate, respectiv din metale și aliaje neferoase (Al, Cu, Ti, Ni, etc.). Acestea se sudează aproape cu toate metodele mai importante de sudare prin topire cu pătrundere medie și mare (cu arc electric și electrod învelit, WIG, MAG, MIG, sub strat de flux, cu plasmă, cu flacără etc.), obținându-se proprietăți mecanice foarte bune, pătrundere bună, consumuri și pierderi reduse de material și tensiuni și deformații mici. În acest fel contracțiile care apar la sudarea unui rând pe o parte se compensează la sudarea rândului respectiv de pe partea cealaltă [Dehelean, (1997)].

Sudarea cap la cap, a plăcii din oțel marca P355NH, cu materialul de adaos Mn3Ni1CrMo, s-a realizat în atelierul mecanic aparținând Institutului Național de Cercetare – Dezvoltare în Sudură și Încercări de Materiale.

După realizarea îmbinării sudate s-a efectuat examinarea vizuală pentru evidențierea eventualelor defecte de suprafață, precum și controlul cu ultrasunete în vederea decelării de discontinuități în materialul depus. Pentru realizarea controlului cu ultrasunete s-a avut în vedere standardul ISO 17640:2010

În continuare s-a trecut la prelevarea diferitelor epruvete atât din îmbinarea sudată cap la cap, cât și din materialul de bază. O parte din epruvetele prelevate din materialul de bază au fost utilizate pentru simularea ciclurilor termice de sudare.

Simularea de cicluri termice pe epruvetele din oțel marca P355NH au fost realizate în cadrul Institutului Național de Cercetare – Dezvoltare în sudură și Încercări de Materiale ISIM Timișoara, utilizând simulatorul de sudură Smitweld LS 14o2. Simulatorul este alcătuit dintr-un transformator electric care furnizează energie pentru încălzirea epruvetei, și din aparatura de comandă și de înregistrare.

Simulatoarele de cicluri termice sunt instalații complexe care reproduc într-o epruvetă ciclurile termice de tipul celor provocate în zona influențată termic (în ZIT) de procesele de sudare. Ciclurile termice de la sudare sunt descrise de relații matematice și de funcții analitice complexe [Uwer (1976), Pascu, (1978), Pascu, (1983)] și au o serie de parametrii specifici printre care se amintesc:

- Temperatura de vârf, T_v în $^{\circ}\text{C}$
- Timpul de răcire, $t_{8/5}$ în domeniul $800^{\circ}\text{C}-500^{\circ}\text{C}$ în s,
- Vitezele de încălzire și de răcire.

După aplicarea simulărilor, (cu sau fără tratament termic post-simulare) epruvetele au fost prelucrate la dimensiunile tipice pentru încercarea prin șoc Charpy.

În cadrul subcapitolului 3.7. intitulat "Examinarea micro/macrosopică" este prezentată o comparație între rezultatele examinărilor micro și macroscopice efectuate asupra unei îmbinarea sudată cap la cap și a unor epruvete simulate cu cicluri termice. Epruvetele au fost extrase dintr-o placă din oțel marca P355NH cu grosimea de 22 mm utilizată la construcția vaselor sub presiune.

S-au utilizat două tipuri de epruvete simulate cu cicluri termice și anume: epruvete simulate cu cicluri termice fără tratament termic post-simulare și epruvete simulate cu cicluri termice cu tratament termic post-simulare.

În urma examinării macroscopice nu s-au observat defecte de tipul fisurilor la proba din oțelul marca P355NH sudată cap la cap cu material de adaos Mn3Ni1CrMo. De asemenea pentru epruvetele simulate cu cicluri termice cu tratament post-simulare respectiv fără tratament post-simulare, nu s-au observat defecte de tipul fisurilor după simulare.

Examinările microscopice relevă structuri normale perlito-feritice în zona influențată termic a îmbinării sudate cu toate că în zona influențată termic simulată fără tratament post-simulare, s-au decelat structuri cu zone martensitice, iar în zona influențată termic simulată și tratată termic post-simulare, structurile au devenit sorbitice.

Conform STAS 5500-74 zonele examinate microscopic nu au prezentat defecte de tipul microfisurilor.

Lipsa microfisurilor în îmbinarea sudată, precum și în epruvetele simulate cu cicluri termice cu și fără tratament post-simulare, a arătat că simularea cu cicluri termice, precum și procedeul de sudare MIG-MAG, au fost efectuate la parametri specifici conform ciclurilor termice de sudare aplicate în timpul încălzirii și răcirii.

După examinarea micro- și macroscopică a probei sudate cap la cap, respectiv a epruvetelor simulate cu cicluri termice cu și fără tratament post-simulare, s-a trecut la determinarea durităților în zonele specifice îmbinării sudate, respectiv în zona influențată termic simulată.

Pe baza rezultatelor obținute în urma încercărilor de duritate HV10 din zonele specifice ale epruvetelor, s-a determinat estimatorul de durificare locală din zonele caracteristice: material de bază (MB), zonă influențată termic (ZIT), sudură (SUD), zonă influențată termic simulată (ZITS).

Pentru epruveta simulată cu cicluri termice fără tratament post-simulare s-au determinat valori de duritate mari până la 437 HV10 în zona influențată termic simulată. În cazul epruvetei simulate și tratate, valorile durităților ajung la maxim 268 HV10 în zona influențată termic simulată.

În cazul analizat s-au obținut valori ale estimatorului de durificare locală sub 50% (47,37% pentru epruveta simulată cu cicluri termice fără tratament post-simulare, respectiv 44,03% la epruveta simulată cu cicluri termice cu tratament post-simulare) drept pentru care se consideră că structurile obținute nu conduc la producerea de ruperi fragile.

S-a observat o bună corelare între rezultatele obținute prin sudare respectiv prin simulare cu cicluri termice cu tratament post-simulare.

În cadrul subcapitol denumit: "Determinarea caracteristicilor de tracțiune" s-a urmărit atingerea obiectivelor de a caracteriza materialul prin încercări statice utilizând epruvete convenționale din oțel marca P355NH. Totodată s-a determinat forța maximă de rupere pentru îmbinarea sudată cap la cap și s-au evaluat rezultatele obținute.

Determinarea caracteristicilor statice ale oțelului P355NH a constat din efectuarea unor încercări de tracțiune la temperatură ambiantă, pe o mașină universală de încercat de ultimă generație. În urma acestei încercări s-au înregistrat curbele caracteristice ale materialului și s-au determinat principalele proprietăți de material.

Determinarea forței de tracțiune maxime și interpretarea rezultatelor obținute pentru îmbinarea sudată cap la cap a plăcii din oțel P355NH a constat din efectuarea a două încercări de tracțiune la temperatură ambiantă, pe o mașină

universală de încercat la tracțiune. Scopul acestor încercări a fost de a se determina forța maximă pentru îmbinarea sudată și de a se analiza zona de rupere. Probele încercate s-au rupt în materialul de bază, în zona în care nu a fost influențate termic.

Modul de rupere evidențiază prezența unei zone de gătuire în materialul de bază neinfluențat termic. Secțiunea globală de rupere este orientată perpendicular pe direcția solicitării de tracțiune.

Unul dintre cele mai importante aspecte pentru evaluarea vaselor sub presiune îl reprezintă tenacitatea la rupere, de obicei, determinată printr-un test de bază adecvat de mecanica ruperii. Cu toate acestea, în multe situații nu este posibilă utilizarea testelor de bază, iar în aceste situații, este necesar să se utilizeze o corelație între energia de rupere Charpy și tenacitate.

Având în vedere că datorită dimensiunilor probele din oțel marca P355NH, supuse simulărilor cu cicluri termice, nu pot fi utilizate pentru evaluarea tenacității la rupere prin încercări clasice, s-a utilizat o corelație la limita inferioară pentru regimul ductil (prag superior) [Bannister, (1998)].

Pentru determinarea energiei de rupere la încercarea de încovoiere prin șoc, s-au utilizat probe din zonele specifice îmbinărilor sudate, respectiv probele simulate cu cicluri termice. S-au prelevat nouă epruvete din proba sudată MIG-MAG: trei epruvete din materialul de bază, trei epruvete din zona influențată termic și trei epruvete din sudură; și cele cinci probe din materialul de bază, care după simularea cu cicluri termice respectiv după aplicarea tratamentului post-simulare, au fost aduse la cotele aferente epruvetelor de tip Charpy.

S-a observat o bună corelație între valoarea medie a energiei de rupere, pentru zona influențată termic (ZIT) respectiv epruvetele simulate cu cicluri termice cu tratament post-simulare. Diferența procentuală dintre acestea este de 11.11%.

De asemenea, valoarea medie a tenacității la rupere în aceleași cazuri, este de $124.12 \text{ MPa} \sqrt{m}$ pentru ZIT, respectiv $132.76 \text{ MPa} \sqrt{m}$ pentru ZITS-T. Diferența procentuală fiind de 6,5%.

Utilizarea metodei de încercare la îndoire transversală laterală pe epruvete prelevate din îmbinarea cap la cap a plăcii din oțel marca P355NH, conform standardului SR EN ISO 5173:2010, s-a realizat în vederea evaluării ductilității și a evaluării în apropierea suprafeței îmbinate a absenței imperfecțiunilor.

Principiul încercării constă în supunerea la deformare plastică a epruvetelor prelevate transversal din îmbinarea sudată cap la cap, prin îndoire fără a se inversa sensul de îndoire, astfel încât secțiunile transversale ale îmbinării sudate să fie supuse la întindere [SR EN ISO 5173].

Încercarea s-a realizat la temperatură ambiantă (23° C).

Pentru acest tip de epruvete fața supusă întinderii este o secțiune transversală a sudurii.

În urma examinărilor suprafețelor externe cât și a celor laterale ale epruvetei nu au fost observate imperfecțiuni.

Metoda excitării prin impuls a fost utilizată în vederea determinării pentru diferite epruvete a modului de elasticitate longitudinal. Cunoașterea modului de elasticitate în diferite zone ale îmbinării sudate reprezintă o etapă foarte importantă în evaluarea fenomenului de concentrare la tensiunilor. De asemenea permite modelarea numerică a stării de tensiune și deformare a îmbinărilor sudate.

Epruvetele utilizate au fost prelevate din îmbinarea sudată cap la cap. S-a determinat pentru materialul de bază (MB), cât și sudură (SUD) respectiv zona influențată termic (ZIT) modulul de elasticitate longitudinal. Totodată a fost

determinat modulul de elasticitate longitudinal pentru probe simulate cu cicluri termice cu și fără tratament post-simulare.

În cadrul **Capitolului 4** intitulat: "Cercetări teoretice privind studiul concentratorilor de tensiune la recipientele sub presiune" sunt prezentate metode analitice cât și metode numerice de analiza a stării de tensiune și deformăție în zona concentratorilor de tensiune.

Subcapitolul 4.2. abordează determinarea limitelor de aplicare a teoriilor de plăci subțiri și groase, utilizând metodele analitice și metodele statice.

Validarea modelului de calcul numeric a fost confirmată de concordanța rezultatelor cu cele calculate analitic în domeniul $h/D = 0.0275-0.2$.

Relațiile de calcul analitic au la bază așa cum este cunoscut o serie de ipoteze simplificatoare, valabile numai pentru anumite domenii, ceea ce restrânge aplicabilitatea lor la domeniile de existență al ipotezelor utilizate. Prin urmare aceste relații se pot utiliza în limitele ale raportului $h/D = 0.01-0.2$.

Metoda numerică de analiză, respectiv metoda elementelor finite utilizată are la bază un algoritm a cărui valabilitate poate fi extinsă pentru orice domeniu al raportului h/D în condițiile în care algoritmul de discretizare este același pentru întreg domeniul analizat. Limitele de aplicare a acestei metode sunt determinate de apariția neliniarităților date de deformațiile mari pentru rapoarte $h/D < 0.0275$.

Subcapitol 3.3. abordează efectul de concentrare al tensiunii în cazul în care sunt prezente două sau mai multe găuri amplasate la o distanță mică între ele, în conformitate cu cerințele de construcție. În aceste cazuri, ipoteza simplificatoare a lui Saint Venant conform căreia la o distanță suficientă față de zona analizată starea de tensiune nu este influențată de modul în care este aplicată sarcina nu poate fi acceptată.

În continuare este studiat coeficientul de concentrare al tensiunilor cu metode numerice folosind metoda elementelor finite și mai precis, pachetul de programe ABAQUS, versiunea 6.9. Sunt studiate diferite cazuri constructive de găuri multiple: două și trei găuri succesive cu același diametru dispuse pe linia generatoare în care variază distanța dintre găuri, două găuri succesive dispuse pe generatoare care se află la o anumită distanță, iar raza găurilor este variabilă.

Validarea modelului numeric s-a realizat prin compararea rezultatelor obținute pentru modele de calcul specific cu rezultatele care sunt cunoscute și prezentate în literatura de specialitate [Peterson, (1974), Pilkey, (1997)]. Pe baza rezultatelor obținute, au fost trasate curbele de variație ale coeficientului teoretic de concentrare a tensiunii pentru toate cazurile enumerate mai sus.

Rezultatele obținute furnizează date suplimentare pentru coeficientul de concentrare al tensiunilor pentru recipientele sub presiune cilindrice cu mai multe găuri, cu diferite aranjamente ale găurilor.

Comparând rezultatele obținute pentru cazul 1 și cazul 2, se poate vedea că prezența a trei găuri succesive conduce la o creștere a coeficientului de concentrare al tensiunii cu 32,14%, comparativ cu cazul a două găuri succesive.

În subcapitolul 4.4. este determinat factorul de intensitate al tensiunii (K_I) pentru un recipient sub presiune cu două găuri dispuse longitudinal.

A fost analizat un recipient sub presiune cu două găuri dispuse longitudinal. Prezența găurilor în recipientul sub presiune duce la apariția unor zone de concentrare a tensiunilor. Grosimea mantalei a fost aleasă ținând cont de dimensiunile plăcii analizată în cadrul capitolului 3 și în funcție de caracteristicile determinate în cadrul programului experimental.

Factorul de intensitate al tensiunii pentru modul I de rupere (K_I) a fost determinat prin metoda integralei pe contur.

Au fost luate în considerare valorile calculate pentru contururile 3-5, pornind de la vârful fisurii. Primele două contururi nu s-au luat în calcul din cauza apariției efectului local.

Determinarea numerică a factorilor de intensitate a tensiunilor pentru modul I de rupere (K_I) pentru recipientul sub presiune cu două găuri dispuse pe aceeași generatoare a condus la concluzionarea următoarelor aspecte:

- pentru lungimi mici ale fisurii (1-5 mm), se observă o creștere notabilă a valorii factorului de intensitate a tensiunii odată cu creșterea lungimii fisurii;
- pentru lungimi mari ale fisurii, se observă o stabilizare a valorilor factorilor de intensitate a tensiunilor, curba căpătând caracteristicile unei asimptote;
- stabilizarea valorii factorilor de intensitate a tensiunilor pentru lungimi mari ale fisurii se datorează, pe de-o parte, rezilienței materialului, dar și prezenței celui de-al doilea concentrator de tensiune (gaură);
- pentru încărcarea aplicată (1 N/mm^2), valorile factorilor de intensitate a tensiunilor sunt inferioare valorii tenacității la rupere ($K_{Ic} = 170 \text{ MPa} \sqrt{m}$);
- pentru încărcarea dată, nici pentru o lungime a fisurii de 30 mm, propagată între cei doi concentratori de tensiune, nu se atinge pragul propagării instabile a fisurii.

Capitolul 5 al lucrării cuprinde concluziile și principalele contribuții originale ale autorului. Principalele contribuții personale ale autorului sunt:

- Realizarea unei sinteze bibliografice privind principalele aspecte în problematica recipientelor sub presiune.
- Realizarea unei sinteze bibliografice cu privire la fenomenul de concentrare al tensiunilor.
- Realizarea unei sinteze bibliografice cu privire la concentratori de tensiune din domeniul vaselor sub presiune: prezentarea soluției lui Lamé pentru un cilindru cu presiune interioară precum, cazul unui cilindru presurizat cu un concentrator de tensiune de tip gaură circulară și cazul unui recipient sub presiune cu pereți în trepte și cu guler de racordare $R/H \approx 10$ [Pikey, (2007)].
- Elaborarea unui program de cercetare experimental cuprinzător asupra oțelului marca P355NH, folosit în construcția vaselor sub presiune.
- Determinarea parametrilor specifici pentru simularea de cicluri termice pe epruvetele din oțel marca P355NH.
- Reproducerea în epruvetele din oțel marca P355NH a ciclurilor termice de tipul celor provocate în zona influențată termic în timpul sudării, utilizând simulatorul de sudură Smitweld LS 14o2.
- Efectuarea examinărilor macroscopice și microscopice asupra îmbinării sudate cap la cap precum și asupra epruvetelor simulate cu cicluri termice cu și fără tratament post simulare.
- Determinarea durităților în zonele specifice îmbinării sudate, respectiv în zona influențată termic simulată pentru îmbinarea sudată cap la cap și pentru epruvetele simulate cu cicluri termice cu și fără tratament post simulare.
- Determinarea energiei de rupere prin încercarea la încovoiere prin șoc, efectuată conform SR EN ISO 148-1 pe epruvete de tip Charpy, prelevate din îmbinarea sudată, respectiv simulate cu cicluri termice cu și fără tratament post-simulare și evidențierea valorilor distincte ale caracteristicilor

de tenacitate ale zonei influențate termic, a materialului de bază și a sudurii. S-a observat ca rezultatele obținute pentru energia de rupere KV, are valori în domeniul ruperii fragile pentru probele simulate cu cicluri termice fără tratament post-simulare. Aplicarea tratamentelor termice post-simulare pe epruvetele simulate cu cicluri termice (ZITS+T), au condus la o îmbunătățire a rezultatelor obținute pentru energia de rupere KV.

- Determinarea tenacității la rupere utilizând o corelație la limita inferioară pentru regimul ductil. S-a observat o bună corelație între valoarea medie a tenacității la rupere pentru zona influențată termic (ZIT) respectiv epruvetele simulate cu cicluri termice cu tratament post-simulare. Diferența procentuală dintre acestea este de 11.11%.
- Determinarea pentru diferitele epruvete a modulului de elasticitate longitudinal utilizând metoda excitării prin impuls
- Determinarea limitelor de aplicare ale metodelor numerice pentru calculul stării de tensiune și deformație pentru plăcile subțiri și groase întrucât datele din literatură nu oferă informații.
- Determinarea coeficientului teoretic de concentrare al tensiunilor pentru un cilindru cu două găuri în care variază diametrul găurilor și distanța dintre ele, pentru care nu există informații în literatura de specialitate.
- Determinarea coeficientului teoretic de concentrare al tensiunilor pentru un cilindru cu trei găuri în care variază distanța dintre găuri, pentru care nu există informații în literatura de specialitate.
- Determinarea factorului de intensitate al tensiunii (K_I) prin metoda integralei pe contur.